

Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc)

[Hydrodynamic modeling of the Rich alluvial aquifer (Central high atlas, Morocco)]

Youssef El KAYSSI¹, Mohamed HILALI², and Ilias KACIMI¹

¹Laboratoire d'Océanologie, Géodynamique et Génie Géologique,
Faculté des Sciences Agdal-Rabat, Maroc

²Laboratoire de Géo-Ingénierie et Environnement,
Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Maroc

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The Rich aquifer is considered as the biggest alluvial aquifer of the high Ziz basin. However, it faces major natural and anthropogenic pressures include the aridity of the region and development of irrigated areas resulting in the rupture of the hydrodynamic balance sheet and accusing the sustainability of socio-economic fabric by the destocking groundwater reserves.

The piezometry of this aquifer shows that the water flow is converging towards the center at the confluence of the Ziz and Sidi Hamza rivers and in the southern part with some local changing of the flow direction between the observed piezometric states 1980 and 2012.

The development of a 3D finite difference mathematical model, in steady state for 1980, lets us to understand the spatial distribution of permeability, recharge and the hydrodynamic behavior of the aquifer.

This model that confirms the hydrogeological functioning of Rich aquifer system was used to calculate the terms of the water balance which is very balanced.

KEYWORDS: Rich alluvial aquifer, hydrogeology, hydrodynamic modeling, steady state, water balance.

RÉSUMÉ: La nappe de Rich est considérée comme la plus importante nappe alluviale du haut bassin de Ziz. Néanmoins, elle est confrontée à des pressions naturelles et anthropiques majeures, notons l'aridité de la région et le développement des superficies irriguées entraînant la rupture de l'équilibre hydrodynamique de la nappe et accusant la durabilité du tissu socio-économique par le déstockage des réserves en eau souterraines disponibles.

La piézométrie de cette nappe montre que l'écoulement est convergent vers le centre de la nappe à la confluence des oueds Sidi Hamza et Ziz et vers le sud dans la partie méridionale avec des changements locaux du sens de l'écoulement observé entre les états piézométriques de 1980 et de 2012.

L'élaboration d'un modèle mathématique 3D aux différences finies, en régime permanent pour l'état de 1980, a permis d'appréhender de la distribution spatiale de la perméabilité et de la recharge. Ce modèle qui confirme le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère de Rich a permis de calculer les différents termes du bilan hydrique qui s'avère très équilibré.

MOTS-CLEFS: Nappe alluviale de Rich, hydrogéologie, modélisation hydrodynamique, régime permanent, bilan hydrique.

1 INTRODUCTION

Le centre de Rich et ses localités environnantes bénéficient de l'existence d'une nappe nommée nappe de Rich, de bonne qualité et accessible aux usagers à des profondeurs relativement faibles. La productivité des captages d'eau est en général bonne, ce qui explique le développement important de l'agriculture irriguée dans cette zone.

Le secteur agricole constitue la principale source de revenu et fait travailler la majeure partie de la population active, il est dominé par la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) et géré par l'office régional de mise en valeur agricole de Tafilalt. La superficie irriguée actuellement atteint 4400 ha.

Les besoins en eau sans cesse croissants de la culture irriguée conjugués aux sécheresses récurrentes qu'a connues la région, entraînent la rupture de l'équilibre hydrodynamique de la nappe et accusent la durabilité du tissu socio-économique par le déstockage des ressources en eaux souterraines.

Il est donc indispensable de savoir le fonctionnement hydraulique de cette nappe et ses potentialités afin de mettre en œuvre un développement soutenu et durable de l'agriculture.

L'étude du fonctionnement hydraulique de la nappe a été faite en fonction de l'analyse des données collectées et inventoriées (lithologie, piézométrie, jaugeage, géophysique, etc.), à l'aide de la modélisation afin d'appréhender la distribution spatiale de ses caractéristiques hydrodynamiques et de quantifier les différentes composantes du bilan.

1.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La nappe alluviale de Rich est située au nord du Maroc au niveau du Haut bassin de Ziz (fig.1). Elle appartient au flanc sud du Haut atlas central au niveau d'une large dépression longitudinale. Il s'agit d'une nappe d'accompagnement de l'oued Ziz où les alluvions quaternaires représentent le faciès réservoir [1], [3], elles sont établies essentiellement sur les marnes du Toarcien-Aalénien qui constituent le substratum imperméable du système aquifère (fig.2). Ces marnes de teinte vert-jaunâtres à vert-brunâtres intercalées parfois avec des lits fins, plus ou moins nombreux de grès calcareux brunâtres et des lits argileux de teinte verte et rougeâtre [2].

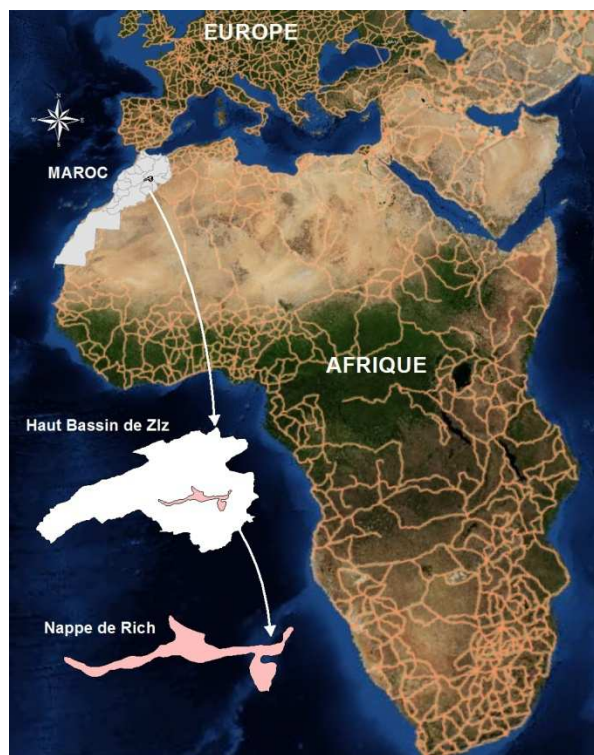


Fig. 1. Situation de la zone d'étude

Le substratum imperméable affleure au centre de la nappe et dans ses limites sud au piémont du Jbel Bou Hamid avec une épaisseur plus ou moins constante pouvant parfois dépasser 300 m.

Les dépôts plio-quadernaires sus-jacents sont représentés par des poudingues, des graviers, des galets, des éléments fluvi-lacustres calcaires et gréseux, parfois marneux, peu perméables, enfin des limons qui constituent généralement le sol [3]. Les formations quadernaires présentent donc une grande hétérogénéité lithologique d'où des perméabilités très variables.

L'analyse des coupes lithologiques des forages mécaniques disponibles montre, un niveau aquifère, constitué par des poudingues, des graviers et des galets en relation avec les alluvions du lit actuel de l'oued Ziz. Les poudingues qui forment généralement le fond de l'aquifère contiennent la réserve principale en eau, alors que les galets et les graviers forment les lieux de cheminement préférentiels et permettent les plus gros débits. En s'éloignant du lit de l'oued, les alluvions sont remplacées par des éléments plus fins, constitués par des dépôts fluvi-lacustres et des calcaires gréseux, parfois marneux, peu perméables.

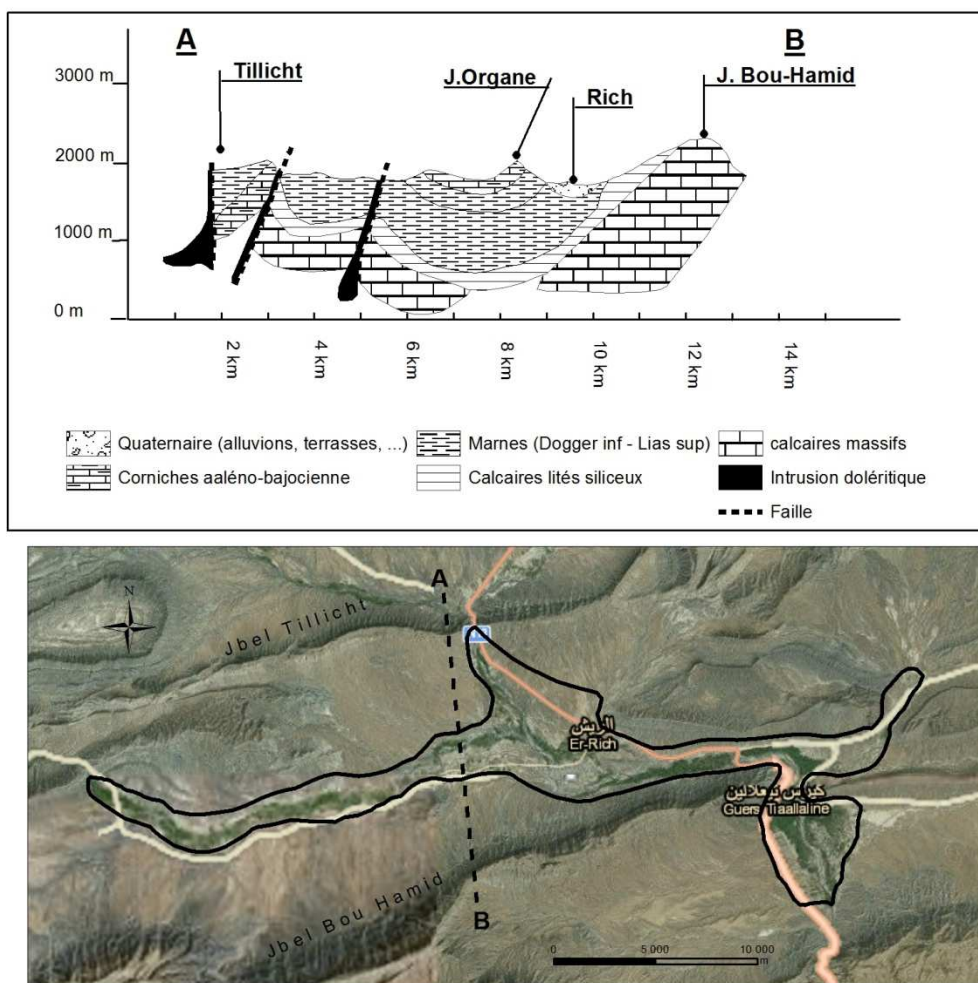


Fig. 2. Coupe structurale schématique (A-B) traversant la zone d'étude selon une direction nord-sud (d'après Du Dresnay (1967, inédit), modifié)

Cette unité hydrogéologique est alimentée essentiellement par les eaux de pluies et les crues de l'oued Ziz et son affluent l'oued Sidi Hamza [1], [3], [4] avec des fluctuations saisonnières peu importantes (fig.3) et un apport moyen annuel d'environ 100 Mm³.

Grâce à ces conditions géologiques et hydrogéologiques naturelles, en saison sèche les deux oueds drainent l'ensemble des formations aquifères avec un niveau piézométrique de la basse vallée qui reste stable d'un étiage à l'autre. Contrairement aux zones latérales plus hautes, les fluctuations piézométriques sont liées à celles de la pluie. Une diminution des pluies durant les années 1980 et 2000/2002 a provoqué une baisse moyenne d'environ 8 m du plan d'eau (fig.4). La hausse des pluies enregistrée à partir de 2001/02 s'est manifestée par une augmentation des niveaux piézométriques de la nappe.

L'écoulement général des eaux souterraines se fait de l'Ouest vers l'Est entre M'zizel et Ait Ouissadene, il devient N-S entre Ait Ouissadene et Ait Saleh [1]. Les cotes piézométriques varient de 1220 m à 1460 m (état de 2012).

La température de l'eau est comprise entre 10 °C et 22 °C, avec une moyenne de 18 °C. La conductivité électrique de l'eau oscille entre 223 et 590 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de près de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

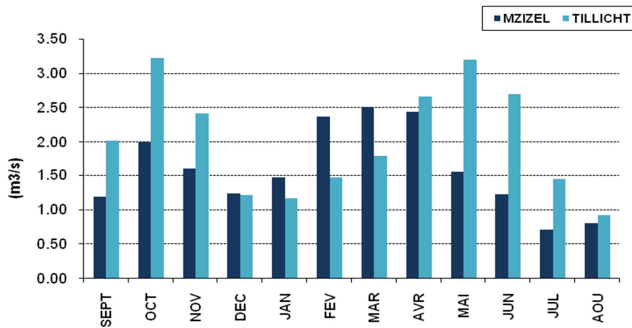


Fig. 3. Fluctuations saisonnières des apports des oueds Ziz et Sidi Hamza (Stations : Tillicht, M'zizel, 1985-2014).

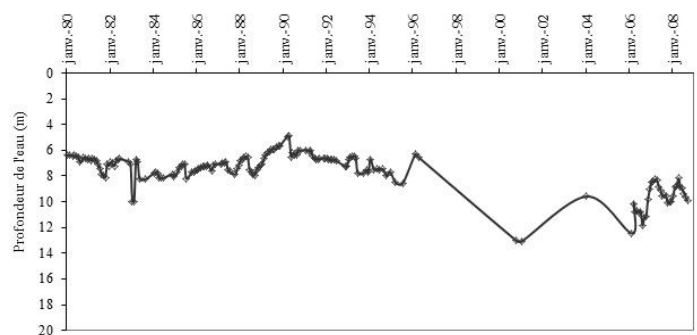


Fig. 4. Historique piézométrique de la nappe (Piézomètre N°IRE 588/39)

2 MATERIEL ET METHODE

L'élaboration du modèle hydrodynamique de la nappe de Rich en régime permanent s'articule sur la délimitation et la discrétisation du domaine à modéliser, une définition des conditions aux limites, l'analyse et la préparation des données physiques (toit, mur, recharge, etc.) et le calage. Ce dernier suppose que le système est stationnaire pour une période donnée. On considère alors que la nappe est en régime d'équilibre stable.

Le calage du modèle est obtenu après un certain nombre de simulations pour aboutir à une bonne concordance entre les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain et les potentiels calculés par le modèle, en affectant à l'aquifère des valeurs de perméabilité conformes aux données disponibles [5], [6], [7].

Par ailleurs, la qualité du calage du modèle peut être appréciée en examinant les critères suivants :

- La reconstitution de la piézométrie de référence ;
- La réparation de la perméabilité ;
- L'erreur du bilan issu du calage.

L'établissement de ce modèle est réalisé à l'aide du logiciel GMS (Groundwater Modeling System). Il s'agit d'une interface graphique modulaire pour MODFLOW, code de calcul aux différences finies en trois dimensions développé par « United States Geological Survey » [8].

2.1 DISCRÉTISATION DU DOMAINE D'ÉCOULEMENT DANS LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE RICH

La zone à modéliser correspond à la zone d'extension de l'aquifère quaternaire de Rich qui s'étend sur environ 110 km². Elle est entourée par un ensemble de rides anticlinales (Jbel Afra, Assamour, Idight, Jbel Bouhmid, etc.), lesquelles sont traversées par l'oued Ziz et l'oued Sidi Hamza formant respectivement les cluses de M'Zizel et Tillicht.

Le système est discrétisé en tenant compte de la densité et de la variabilité des données disponibles, selon des mailles carrées régulières de 200 mètres de côté, disposées sur 69 lignes et 210 colonnes (fig.5). Verticalement, nous avons considéré un système monocouche et les hauteurs des mailles sont variables et correspondent aux épaisseurs des formations quaternaires (fig.6).

Les mailles situées à l'extérieur des zones d'extension du système ont été inactivées pour restituer précisément la superficie du réservoir aquifère. Les mailles actives, qui correspondent effectivement à l'emprise du système aquifère, sont au nombre de 2429 mailles, tandis que les mailles frontières sont au nombre de 546.

2.2 CONDITIONS AUX LIMITES

Le choix des conditions aux limites constitue une phase importante de la mise en œuvre du modèle. Leur impact sur la qualité des résultats est majeur (in Benfarji, 2007). La synthèse hydrogéologique a permis de déterminer la nature des limites du système aquifère, ses particularités et de les intégrer au sein du modèle. Ces conditions aux limites se répartissent de la façon suivante (fig.5) :

- Au niveau de la cluse de M'zizel qui constitue le premier point de départ de l'aquifère avec une continuité hydraulique en amont du système le long du lit de l'oued Ziz : une condition de flux imposé entrant a été retenue pour l'état de référence de 1980.
- Au niveau de la cluse de Foum Tillicht qui constitue le deuxième point de départ de l'aquifère avec une continuité hydraulique en amont du système le long du lit de l'oued Sidi Hamza : un flux imposé entrant a été retenu pour l'état de référence de 1980.
- En aval de la nappe, la cluse de Foum Zaabel, constitue une zone de décharge de la nappe avec une continuité hydraulique le long du lit de l'oued Ziz : un flux imposé sortant a été retenu pour l'état de référence de 1980.
- Une limite à potentiel imposé le long des oueds Ziz et Sidi Hamza à l'intérieur du domaine à modéliser.
- Une limite à flux nuls dans le reste de la nappe car ils correspondent aux limites naturelles du Quaternaire, sans continuité hydraulique avec les formations géologiques latérales.

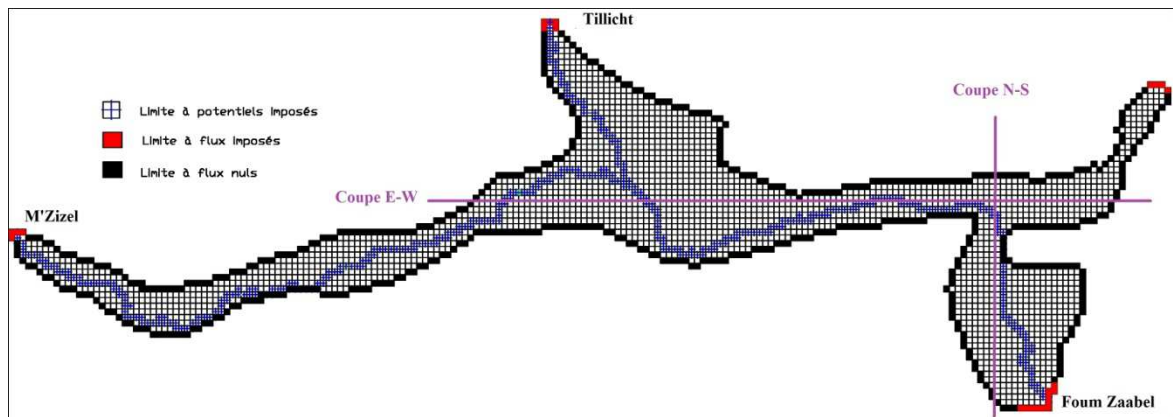


Fig. 5. Discretisation du domaine d'étude avec emplacement de deux coupes N-S et E-W

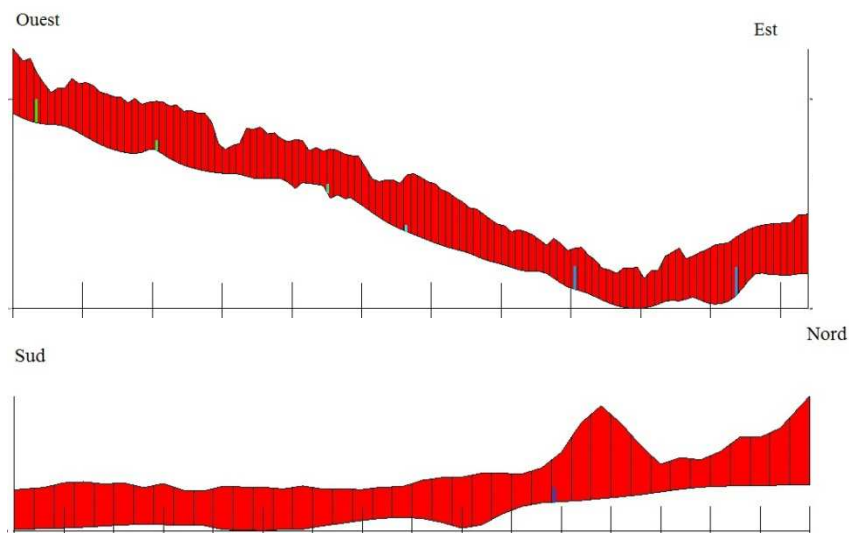


Fig. 6. Coupes N-S et E-W à l'intérieur du domaine discrétisé

2.3 PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES

Les essais de pompage réalisés dans la zone d'étude concernent seulement les nappes profondes. Pour pallier à ce problème nous avons procédé à se rapprocher aux valeurs ponctuelles de la perméabilité des dépôts quaternaires en affectant à chaque type de faciès sa perméabilité correspondante, en se basant sur la classification de De Marsily (1981). (Tab. 1).

Tableau 1. Conductivités hydrauliques correspondantes aux faciès lithologiques selon De Marsily

Roche	Conductivité correspondante (m/s)
Galets	$10^{-1} - 10^{-2}$
Graviers	$10^{-1} - 10^{-5}$
Calcaires gréseux	$10^{-3} - 10^{-5}$
Calcaires marneux	$>10^{-5}$

Cette approche a permis de générer un zoning initial basé sur quatre champs homogènes de perméabilités, dont les valeurs s'échelonnent entre 10^{-2} m/s et 10^{-7} m/s.

2.4 CHOIX DE L'ÉTAT DE RÉFÉRENCE ET SOLlicitATIONS DE LA NAPPE

La piézométrie de référence choisie pour la simulation du modèle en régime permanent est celle relevée en 1980. Le choix de cet état est justifié par le fait que c'est le plus ancien état disponible et que, à cette époque, la nappe était très peu sollicitée et sous régime naturel d'alimentation à partir des précipitations et du drainage naturel par les oueds Ziz et Sidi Hamza.

2.5 RECHARGE PAR LES PRÉCIPITATIONS

Le potentiel pluviométrique de la zone d'étude est établi sur la base des moyennes interannuelles des séries actualisées des stations pluviométriques proches (stations de M'zizel, Foum Tillicht et Foum Zaâbel). L'application du coefficient d'infiltration directe de la pluie sur la zone d'étude est effectuée en tenant compte de la répartition de la pluie moyenne annuelle sur les différentes zones d'affleurement de l'aquifère. Ces zones d'alimentation représentent une superficie totale de près de 110 Km². Le volume de la pluie infiltrée directement sur la zone d'étude, moyennant un coefficient d'infiltration de 5% (DRHGRZ, 2007) et une pluie moyenne de 185 mm est de 1.11 Mm³.

2.6 RECHARGE PAR INFILTRATION DES EAUX DE CRUES

La recharge par infiltration dans le lit des oueds concerne donc l'infiltration des eaux de crues qui proviennent de l'extérieur du domaine modélisé.

Les débits des oueds Ziz et Sidi Hamza sont contrôlés à l'entrée de la nappe, respectivement, par les stations d'Amouguer M'Zizel et Foum Tillicht. Un coefficient de 4% est appliqué aux apports moyens des cours d'eau à leur entrée à la nappe. Ce coefficient est moins important que celui relatif aux précipitations du fait que les vitesses des eaux de crues sont plus élevées. Cette recharge est répartie tout le long des lits des oueds avec un volume calculé de 4.5 Mm³.

2.7 FLUX ENTRANTS

La synthèse hydrogéologique a montré qu'il existe une continuité hydraulique avec l'extérieur en amont de la nappe au droit des cluses de M'zizel et de Foum Tillicht. Ces deux continuités permettent une communication entre la nappe alluviale de Rich et les zones externes.

Le flux entrant au niveau de la cluse de M'zizel est estimé à près de 0.28 Mm³. Il est obtenu en tenant compte d'un front de nappe de 1600 m, un gradient hydraulique de 0.005 et une transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s.

Le flux entrant au niveau de la cluse de Foum Tillicht est estimé à près de 0.26 Mm³. Il est obtenu en tenant compte d'un front de nappe de 1150 m, un gradient hydraulique de 0.007 et une transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s.

2.8 FLUX SORTANTS

Les flux sortants sont estimés au droit de la cluse de Foum Zaabel. Ces flux sont estimés à près de 0.47Mm^3 en tenant compte d'un front de nappe de l'ordre de 3000 m, un gradient hydraulique de 0.005 et une transmissivité de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.9 LES PRÉLÈVEMENTS

Les prélèvements par pompages sont supposés nuls (état avant développement du pompage et du périmètre irrigué).

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Le calage du modèle est destiné à reproduire le régime permanent de l'état de référence pris en considération. Il est obtenu après avoir procédé à un certain nombre de simulations pour aboutir à une bonne concordance entre les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain et les potentiels calculés par le modèle.

Les opérations du calage sont menées de sorte que :

- Le modèle simule bien la piézométrie de référence, aussi bien dans son allure que dans ses niveaux ;
- Le modèle affiche des perméabilités qui varient dans des fourchettes raisonnables ;
- Le modèle arrive bien à restituer le bilan de la nappe, en particulier dans ses composantes les plus connues (convergence acceptable, peu de mailles dénoyées, entrées et sorties par les limites à potentiel imposé réalistes)

L'état de référence retenu pour caler le modèle en régime permanent est la piézométrie de 1980 correspondant à l'état avant le début des pompages.

3.1 AJUSTEMENT DES PERMÉABILITÉS

Une part importante du calage consiste en l'ajustement des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Il s'agit d'une opération importante qui conditionne l'écoulement souterrain. En effet, une fois le bilan des entrées-sorties est équilibré, une précision des écoulements à l'intérieur du modèle a été procédée, c'est en modifiant localement les perméabilités en se basant sur la piézométrie observée et les débits de drainage.

Le calage a été mené en s'attachant à respecter au mieux les grandes plages de perméabilité identifiées dans l'aquifère, et en essayant d'affecter à l'aquifère des valeurs de perméabilité conformes aux données éparses disponibles.

La carte obtenue, suite au calage du modèle, montre la répartition spatiale de la perméabilité (fig.7). Cette dernière varie entre $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ et $4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. On distingue principalement quatre zones :

Dans la zone ouest, entre M'Zizel et Rich, la perméabilité est faible, inférieure à $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Au niveau de la zone centrale, la perméabilité s'élève pour atteindre son maximum 10^{-3} m/s au niveau de la zone principale de convergence des eaux (près du centre de Rich).

L'axe Rich-Ait Ouissadene-Ait Salah se caractérise par une bonne perméabilité (supérieure à $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$), cela est justifié par le gradient hydraulique qui devient faible surtout dans la partie sud.

A l'Ouest d'Ait Ouissadene, la perméabilité devient faible, inférieure à $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

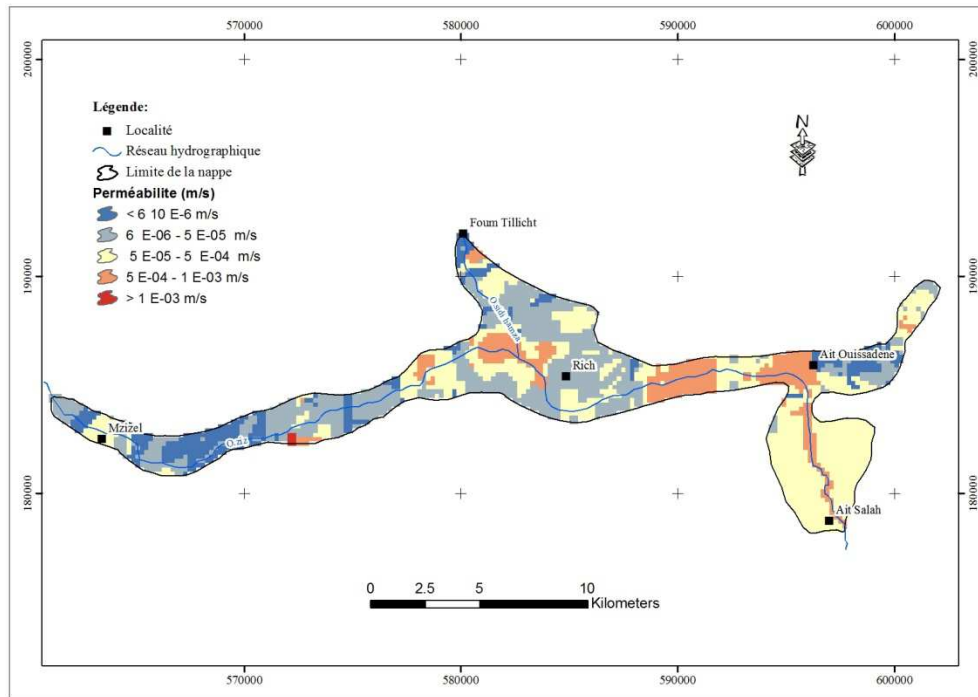


Fig. 7. Carte des perméabilités calculées à l'issue du modèle (m/s)

3.2 CALAGE DE LA PIÉZOMÉTRIE

L'examen du graphe de calibration montre une bonne concordance entre la piézométrie calculée et celle mesurée sur le terrain. L'écart entre les deux piézométries ne dépasse pas 1 mètre pour la majorité des points d'observation (fig 8).

Au terme du calage, une très bonne concordance s'opère entre la piézométrie observée (état de 1980) et celle simulée, cette dernière est représentée dans la figure 9.

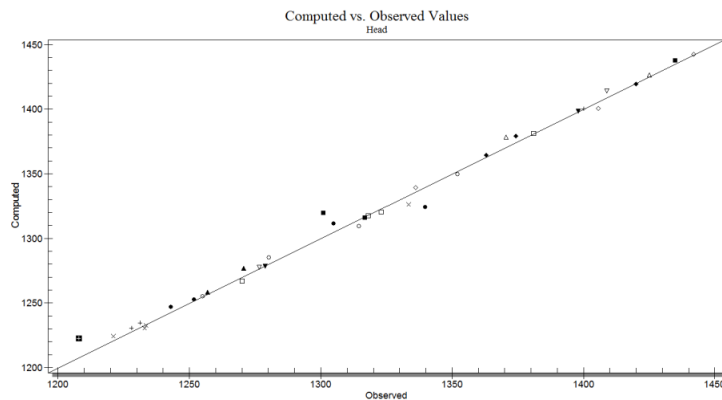


Fig. 8. Corrélation entre les piézométries calculée et mesurée en régime permanent

3.3 BILAN DU MODÈLE

Le calage du modèle en régime permanent a permis la reconstitution du bilan global de la nappe par évaluation de ses différentes composantes (tab. 2).

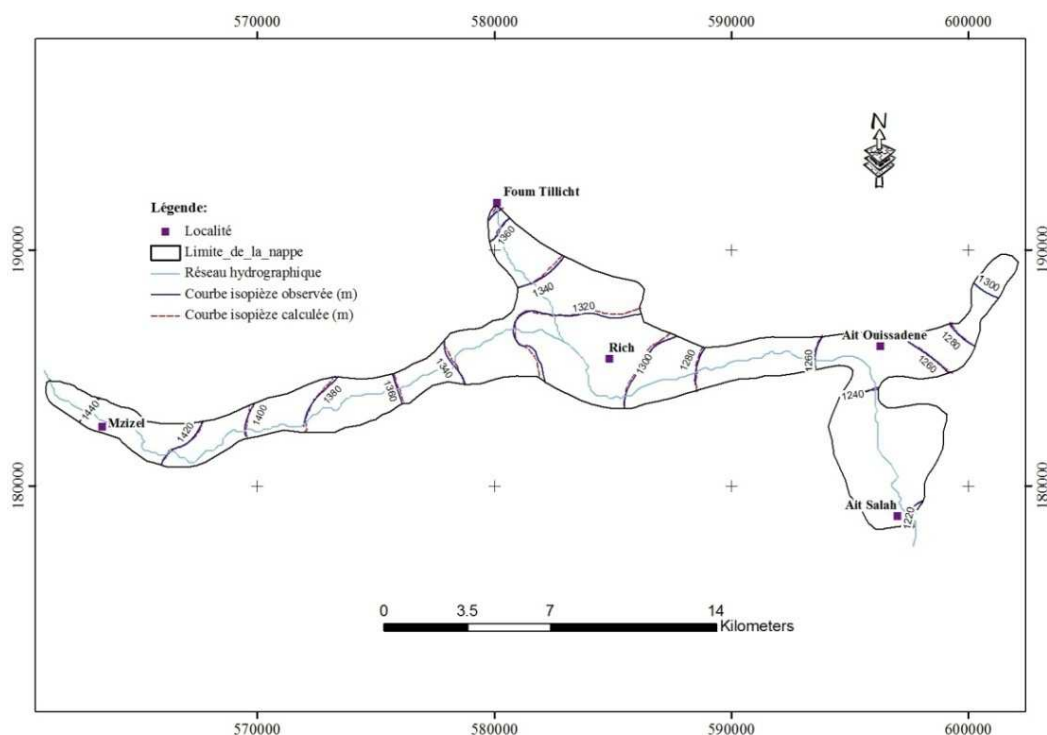


Fig. 9. Comparaison entre la piézométrie calculée et celle observée

Tableau 2. Bilan hydrique calculé en régime permanent

	Terme du bilan	Apport Mm3
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de crues	4.5698
	Drainage souterrain	0.0007
	Recharge par les précipitations	2.2729
	Total	6.8433
Sorties	Oueds	6.8847
	Drainage souterrain	0.0002
	Total	6.8848

4 CONCLUSION

L'étude de la modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich a montré, en régime permanent et après calage, une bonne concordance entre la piézométrie observée et celle calculée.

Le résultat du calage du modèle a montré que la nappe alluviale de Rich est caractérisée par une hétérogénéité importante en terme de perméabilité et cela en concordance avec l'hétérogénéité lithologique du réservoir aquifère qui est composé d'un matériel variable allant depuis les alluvions grossiers jusqu'à des dépôts fluvio-lacustres marneux ou gréseux.

Les perméabilités reconstituées par le modèle montrent que les zones les plus perméables de l'aquifère (10^{-3} à 10^{-2} m/s) se situent dans la zone de Rich, ailleurs les perméabilités sont relativement faibles (jusqu'à 10^{-5} m/s).

Le bilan obtenu par le modèle en régime permanent montre que l'essentiel de la recharge de la nappe s'effectue par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67%. La recharge par les précipitations représente seulement 33% des entrées de la nappe.

Les résultats préliminaires de ce modèle constitueront la base des simulations futures en régime transitoire. Ce dernier permettra d'étudier l'effet des prélèvements par pompage sur la nappe et les prévisions futures sur l'exploitation des ressources en eau souterraines de la région de Rich.

REMERCIEMENTS

Nos sincères remerciements à Monsieur le Directeur de l'Agence du bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéis qui a mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour le bon déroulement de l'activité Terrain, et en mettant aussi à notre disposition les données requises par le modèle.

RÉFÉRENCES

- [1] ABH du Guir-Ziz-Rhéis. Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau des bassins du Guir, Ziz, Rhéis et Maider. Rapport de la mission 1, 2011.
- [2] Ait Addi A, Les séries du Dogger du Haut Atlas au Nord d'Errachidia : sédimentologie et lithostratigraphie d'une nouvelle formation la formation Tazigzaout," Revue de Géologie Méditerranéenne, Tome XXVII, 1-2, pp. 63, 2000.
- [3] Hilali M., Boualoul M., Sahbi H., et Benamara A., 2012 : Haut Atlas de Rich (Maroc) : Impact des changements climatiques et des unités structurales sur la quantification des ressources en eau. 2ème Colloque International sur la Gestion et la Préservation des Ressources en Eau (CIGPRE 2). Meknès, les 10 – 11 et 12 mai 2012.
- [4] Hilali M., 2015 : Hydrogéologie et ressources en eau du Tafilalet et ses régions limitrophes (Sud-Est du Maroc) : Connaissance, prospection, caractérisation, exploitation et gestion des ressources en eau. Rapport de l'habilitation universitaire, Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V.
- [5] El Guerouani A, Modélisation mathématique en hydrogéologie, support du cours, Maitrise Es sciences et techniques 2 : spécialité Hydrogéologie, Département des sciences de la terre, FST Fès-Saïss, 2005.
- [6] El Idrysy, H & De Smedt, F, Modelling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco," Hydrogeology journal, vol. 14, pp. 1265-1276, 2006.
- [7] Ledoux E., Modèles mathématiques en hydrogéologie, Centre d'information géologique, Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, 1986.
- [8] USGS Office of Groundwater, 2015. [Online] Available : <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html> (July 06, 2015)